

JO P 17 07



① BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑩ DE 197 14 607 A 1

② Aktenzeichen: 197 14 607.4  
② Anmeldetag: 9. 4. 97  
④ Offenlegungstag: 15. 10. 98

⑤ Int. Cl.<sup>6</sup>:  
H 02 N 2/06  
B 06 B 1/06  
// F02D 41/20, F02M  
51/00

B4  
DE 197 14 607 A 1

⑦ Anmelder:

Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

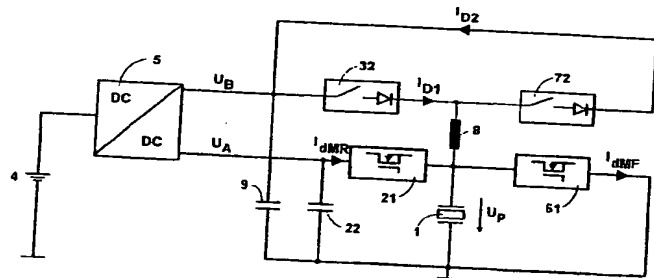
⑦ Erfinder:

Reineke, Joerg, 70469 Stuttgart, DE; Hock,  
Alexander, 70435 Stuttgart, DE; Schwarz, Franz, Dr.,  
71665 Vaihingen, DE; Boecking, Friedrich, 70499  
Stuttgart, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤ Verfahren und Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements

⑦ Es werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Laden oder Entladen eines piezoelektrischen Elements (1) beschrieben, wobei das Laden oder Entladen schrittweise in mehreren Stufen erfolgt. Das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung zeichnen sich dadurch aus, daß das Laden oder Entladen teils über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element (21; 61) und teils über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element (8; 31; 71) erfolgt. Dadurch kann erreicht werden, daß der Verlauf des Ladens und des Entladens von piezoelektrischen Elementen bei minimaler Verlustleistungserzeugung wunschgemäß im wesentlichen beliebig beeinflussbar ist.



DE 197 14 607 A 1

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 14, d. h. ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Laden oder Entladen eines piezoelektrischen Elements, wobei das Laden oder Entladen schrittweise in mehreren Stufen erfolgt.

Bei den vorliegend näher betrachteten piezoelektrischen Elementen handelt es sich insbesondere, aber nicht ausschließlich um als Aktoren bzw. Stellglieder verwendete piezoelektrische Elemente. Piezoelektrische Elemente lassen sich für derartige Zwecke einsetzen, weil sie bekanntermaßen die Eigenschaft aufweisen, sich in Abhängigkeit von einer daran angelegten Spannung zusammenzuziehen oder auszudehnen.

Die praktische Realisierung von Stellgliedern durch piezoelektrische Elemente erweist sich insbesondere dann von Vorteil, wenn das betreffende Stellglied schnelle und/oder häufige Bewegungen auszuführen hat.

Der Einsatz von piezoelektrischen Elementen als Stellglied erweist sich unter anderem bei Kraftstoff-Einspritzdüsen für Brennkraftmaschinen als vorteilhaft. Zur Einsetzbarkeit von piezoelektrischen Elementen in Kraftstoff-Einspritzdüsen wird beispielsweise auf die EP 0 371 469 B1 und die EP 0 379 182 B1 verwiesen.

Piezoelektrische Elemente sind kapazitive Verbraucher, welche sich, wie vorstehend teilweise bereits angedeutet wurde, entsprechend dem jeweiligen Ladungszustand bzw. der sich daran einstellenden oder angelegten Spannung zusammenziehen und ausdehnen.

Zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements sind zwei grundlegende Prinzipien bekannt, nämlich das Laden und Entladen über einen ohmschen Widerstand und das Laden und Entladen über eine Spule, wobei sowohl der ohmsche Widerstand als auch die Spule unter anderem dazu dienen, den beim Laden auftretenden Ladestrom und den beim Entladen auftretenden Entladestrom zu begrenzen.

Die erste Variante, d. h. das Laden und Entladen über einen ohmschen Widerstand ist in Fig. 5 veranschaulicht.

Das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element, welches in der Fig. 5 mit dem Bezugszeichen 101 bezeichnet ist, ist mit einem Ladetransistor 102 und einem Entladetransistor 103 verbunden.

Der Ladetransistor 102 wird durch einen Ladeverstärker 104 angesteuert und verbindet im durchgeschalteten Zustand das piezoelektrische Element 101 mit einer positiven Versorgungsspannung; der Entladetransistor 103 wird durch einen Entladeverstärker 105 angesteuert und verbindet im durchgeschalteten Zustand das piezoelektrische Element 101 mit Masse.

Im durchgeschalteten Zustand des Ladetransistors 102 fließt über diesen ein Ladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 geladen wird. Mit zunehmender Ladung des piezoelektrischen Elements 101 steigt die sich an diesem einstellende Spannung, und dementsprechend verändern sich auch dessen äußere Abmessungen. Ein Sperren des Ladetransistors 102, also ein Unterbrechen oder Beenden des Ladevorganges bewirkt, daß die im piezoelektrischen Element 101 gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 101 im wesentlichen unverändert beibehalten werden.

Im durchgeschalteten Zustand des Entladetransistors 103 fließt über diesen ein Entladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 entladen wird. Mit zunehmender Entladung des piezoelektrischen Elements 101 sinkt die sich

an diesem einstellende Spannung, und dementsprechend verändern sich auch dessen äußere Abmessungen. Ein Sperren des Entladetransistors 103, also ein Unterbrechen oder Beenden des Entladevorganges bewirkt, daß die im piezoelektrischen Element 101 noch gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 101 beibehalten werden.

Der Ladetransistor 102 und der Entladetransistor 103 wirken für den Ladestrom bzw. für den Entladestrom wie steuerbare ohmsche Widerstände. Die dadurch gegebene Steuerbarkeit des Ladestroms und des Entladestroms ermöglicht es, den Ladevorgang und den Entladevorgang genau wunschgemäß ablaufen zu lassen. Der durch den Ladetransistor 102 fließende Ladestrom und der durch den Entladetransistor 103 fließende Entladestrom erzeugen dort jedoch nicht unerhebliche Verlustleistungen. Die in den Transistoren verbrauchte Verlustenergie ist pro Lade-Entladezyklus mindestens doppelt so hoch wie die im piezoelektrischen Element 101 gespeicherte Energie. Diese hohe Verlustenergie bewirkt eine sehr starke Aufheizung, des Ladetransistors 102 und des Entladetransistors 103, was erkennbar ein Nachteil ist.

Das betrachtete Lade- und Entladeverfahren ist daher insbesondere dann, wenn häufige und/oder umfangreiche Lade- und Entladevorgänge durchzuführen sind, entweder gänzlich unbrauchbar oder allenfalls eingeschränkt brauchbar.

Nicht zuletzt deshalb kommt häufig die vorstehend bereits erwähnte zweite Variante zum Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements, d. h. das Laden und Entladen über eine Spule zum Einsatz; eine praktische Realisierung dieser zweiten Variante ist in Fig. 6 veranschaulicht.

Das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element, welches in der Fig. 6 mit dem Bezugszeichen 201 bezeichnet ist, ist Bestandteil eines über einen Ladeschalter 202 schließbaren Ladestromkreises und eines über einen Entladeschalter 206 schließbaren Entladestromkreises, wobei der Ladestromkreis aus einer Serienschaltung des Ladeschalters 202, einer Diode 203, einer Ladespule 204, des piezoelektrischen Elements 201, und einer Spannungsquelle 205 besteht, und wobei der Entladestromkreis aus einer Serienschaltung des Entladeschalters 206, einer Diode 207, einer Entladespule 208 und des piezoelektrischen Elements 201 besteht.

Die Diode 203 des Ladestromkreises verhindert, daß im Ladestromkreis ein das piezoelektrische Element entladender Strom fließen kann. Die Diode 203 und der Ladeschalter 202 sind gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

Die Diode 207 des Entladestromkreises verhindert, daß im Entladestromkreis ein das piezoelektrische Element ladender Strom fließen kann. Die Diode 207 und der Entladeschalter 206 sind wie die Diode 203 und der Ladeschalter 202 gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

Wird der normalerweise geöffnete Ladeschalter 202 geschlossen, so fließt im Ladestromkreis ein Ladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 201 geladen wird; die im piezoelektrischen Element 201 gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 201 werden nach dem Laden desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Wird der normalerweise ebenfalls geöffnete Entladeschalter 206 geschlossen, so fließt im Entladestromkreis ein Entladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 201 entladen wird; der Ladezustand des piezoelektrischen Elements 201 bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen

gen des piezoelektrischen Elements 201 werden nach dem Entladen desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Sowohl der Lade- und Entladestromkreis sind frei von nennenswerten ohmschen Widerständen. Die durch das Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements (das Fließen des Ladestroms und des Entladestroms durch ohmsche Widerstände) erzeugte Wärmeenergie ist daher äußerst gering.

Andererseits sind aber das Ausmaß und der zeitliche Verlauf des Ladens und des Entladens häufig nicht ideal. Störend sind vor allem zeitlich variierende Lade- und Entladegeschwindigkeiten, mehr oder weniger stark ausgeprägte Einschwingvorgänge und ein nur teilweises oder zu starkes Laden und/oder Entladen des piezoelektrischen Elements, wodurch beim Entladen sogar ein Aufladen mit entgegengesetzter Polarität erfolgen kann.

Verantwortlich für das Auftreten derartiger Effekte ist das Zusammenwirken von Ladespule 204 und piezoelektrischem Element 201 bzw. von Entladespule 206 und piezoelektrischem Element 201. Die Ladespule 204 und das piezoelektrische Element 201 sowie die Entladespule 206 und das piezoelektrische Element 201 wirken beim Laden und Entladen nämlich jeweils als ein LC-Reihenschwingkreis, dessen Eigenschaften durch die Induktivitäten der jeweiligen Spulen und die Kapazität des piezoelektrischen Elements bestimmt werden und anderweitig nicht ohne weiteres gezielt beeinflussbar sind; hiervon ist auch der Umfang des Ladens und des Entladens betroffen.

Eine Möglichkeit der Einflußnahme hierauf besteht darin, daß das unter Bezugnahme auf die Fig. 6 beschriebene Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements mit zwischenzeitlichen Unterbrechungen stufenweise erfolgt. Ein derartiges Lade- und Entladeverfahren ist in der EP 0 371 469 B1 beschrieben und stellt ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 dar.

Durch ein mehrstufiges Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements läßt sich im wesentlichen jedoch nur das Einschwingverhalten der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung verbessern. Andere Parameter wie beispielsweise die Steilheit und der Umfang des Anstiegs oder des Abfalls der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung sind auf diese Weise jedoch nicht beeinflussbar.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, das Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. die Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 14 derart weiterzubilden, daß dadurch der Verlauf des Ladens und des Entladens von piezoelektrischen Elementen bei minimaler Verlustleistungserzeugung wunschgemäß im wesentlichen beliebig beeinflussbar ist.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 (Verfahren) und durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 14 (Vorrichtung) beanspruchten Merkmale gelöst.

Demnach ist vorgesehen,

- daß das Laden oder Entladen teils über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element und teils über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element erfolgt (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 1) bzw.
- daß sowohl ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element als auch ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element vorgesehen sind, und daß diese Elemente derart angeordnet sind,

daß das Laden oder Entladen teils über das für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als Resistanz wirkende Element und teils über das für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als Induktanz wirkende Element erfolgen kann (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 14).

Das Laden bzw. Entladen des piezoelektrischen Elements über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element, also beispielsweise über einen ohmschen Widerstand oder ein wie ein ohmscher Widerstand wirkendes Element ermöglicht es, allein durch eine Veränderung des wirkenden ohmschen Widerstandes, also auf denkbar einfache Art und Weise eine gewünschte (bei Bedarf auch zeitlich veränderliche) Lade- und Entladegeschwindigkeit zu erzielen und das Laden oder Entladen zu beliebigen Zeitpunkten sofort und definiert zu unterbrechen oder zu beenden.

Das Laden bzw. Entladen des piezoelektrischen Elements über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element, also beispielsweise über eine Spule oder ein wie eine Spule wirkendes Element ermöglicht es, die beim Laden bzw. Entladen entstehende Wärmeenergie gering zu halten.

Werden das Laden und das Entladen des piezoelektrischen Elements insbesondere während Lade- und/oder Entladeabschnitten, in denen es auf die Einhaltung eines vorbestimmten Lade- oder Entladeverlaufs ankommt, über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element, und während der restlichen Lade- und/oder Entladeabschnitte, d. h. während der Lade- und/oder Entladeabschnitte, in denen es nicht oder nicht so sehr auf die Einhaltung eines vorbestimmten Lade- oder Entladeverlaufs ankommt, über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element durchgeführt, so gelangt man im Ergebnis zu einem Verfahren, durch welches der Verlauf des Ladens und des Entladens von piezoelektrischen Elementen bei minimaler Verlustleistungserzeugung wunschgemäß im wesentlichen beliebig beeinflussbar ist.

Die geringe Verlustleistung, die beim Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements erzeugt wird (weil das Laden und Entladen nur teilweise über ein für den Lade- und Entladestrom als Resistanz wirkendes Element erfolgt), ermöglicht es, einen gegebenenfalls erforderlichen Aufwand zur Kühlung der sich erwärmenden Elemente auf ein unter den gegebenen Umständen minimales Ausmaß zu reduzieren.

Andererseits ermöglicht das nur teilweise Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element eine Verkleinerung dieses beispielsweise durch eine Spule realisierten Elements, da nicht die gesamte Energie über diese übertragen werden muß. Genauer gesagt kann der Spulenkern klein gehalten werden, denn dieser muß "nur" so groß sein, daß bei dem fließenden Lade- und Entladestrom nicht die Sättigung erreicht wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung sind den herkömmlichen Verfahren zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen damit gleich in mehrfacher Hinsicht überlegen.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert. Es zeigen

Fig. 1 eine zum Laden eines piezoelektrischen Elements nach dem erfindungsgemäßen Verfahren geeignete erfin-

dungsgemäße Schaltung,

Fig. 2 eine zum Entladen eines piezoelektrischen Elements nach dem erfindungsgemäßen Verfahren geeignete erfindungsgemäße Schaltung,

Fig. 3 eine zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements nach dem erfindungsgemäßen Verfahren geeignete erfindungsgemäße Schaltung,

Fig. 4 den zeitlichen Verlauf von sich beim Betrieb der Schaltung gemäß Fig. 3 einstellenden Spannungs- und Stromverläufen,

Fig. 5 eine herkömmliche Schaltung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements über für den Lade- und Entladestrom als ohmsche Widerstände wirkende Elemente, und

Fig. 6 eine herkömmliche Schaltung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements über für den Lade- und Entladestrom als Spulen wirkende Elemente.

Die piezoelektrischen Elemente, deren Laden und Entladen im folgenden näher beschrieben wird, sind beispielsweise als Stellglieder in Kraftstoff-Einspritzdüsen (insbesondere in sogenannten Common Rail Injektoren) von Brennkraftmaschinen einsetzbar. Auf einen derartigen Einsatz der piezoelektrischen Elemente besteht jedoch keinerlei Einschränkung; die piezoelektrischen Elemente können grundsätzlich in beliebigen Vorrichtungen für beliebige Zwecke eingesetzt werden.

Es wird davon ausgegangen, daß sich die piezoelektrischen Elemente im Ansprechen auf das Laden ausdehnen und im Ansprechen auf das Entladen zusammenziehen. Die Erfindung ist jedoch selbstverständlich auch dann anwendbar, wenn dies gerade umgekehrt ist.

Es wird nun unter Bezugnahme auf Fig. 1 zunächst das Laden eines piezoelektrischen Elements beschrieben.

Das piezoelektrische Element, das es im betrachteten Beispiel zu laden gilt, ist in der Fig. 1 mit dem Bezugszeichen 1 bezeichnet.

Das piezoelektrische Element 1 ist Bestandteil zweier unabhängig voneinander arbeitender Ladestromkreise, nämlich eines ersten Ladestromkreises 2 und eines zweiten Ladestromkreises 3.

Der erste Ladestromkreis 2 enthält neben dem piezoelektrischen Element 1 eine Strombegrenzungseinheit 21 und einem Kondensator 22, wobei diese Elemente wie in der Fig. 1 gezeigt verschaltet sind.

Der zweite Ladestromkreis 3 enthält neben dem piezoelektrischen Element 1 eine Ladespule 31, einen Halbleiterschalter 32 und einen Kondensator 33, wobei diese Elemente wie in der Fig. 1 gezeigt verschaltet sind.

Zur Stromversorgung der Ladestromkreise ist eine aus einer Batterie 4 (beispielsweise einer KFZ-Batterie) und einem Gleichspannungswandler 5 bestehende Spannungsquelle vorgesehen. Der Gleichspannungswandler 5 erzeugt aus der Batteriespannung (beispielsweise 12 V) eine erste Gleichspannung  $U_A$  und eine zweite Gleichspannung  $U_B$ , wobei die erste Gleichspannung  $U_A$  über den Kondensator 22 an den ersten Ladestromkreis 2 und die zweite Gleichspannung  $U_B$  über den Kondensator 33 an den zweiten Ladestromkreis 3 angelegt werden; die Kondensatoren 22 und 33 dienen als Pufferkondensatoren.

Die Spannungen  $U_A$  und  $U_B$ , die der Gleichspannungswandler 5 aus der Batteriespannung erzeugt, sind unabhängig voneinander und können beliebige Werte annehmen; bei Bedarf kann vorgesehen werden, die Spannungen variabel einstellbar zu machen.

Die Batterie 4 und der Gleichspannungswandler 5 sind durch beliebige andere Spannungsquellen ersetzbar, die in der Lage sind, Gleichspannungen  $U_A$  und  $U_B$  zu erzeugen und/oder die Kondensatoren 22 und 33 auf diese Spannun-

gen aufzuladen; die Kondensatoren 22 und 33 können unter Umständen auch weggelassen werden.

Der erste Ladestromkreis 2 entspricht im wesentlichen dem zur Ladung des piezoelektrischen Elements 101 vorgesehenen Teil der Schaltung gemäß Fig. 5, wobei die Strombegrenzungseinheit 21 des ersten Ladestromkreises 2 dem Ladetransistor 102 und dem diesen ansteuernden Ladeverstärker 104 entspricht, und wobei im ersten Ladestromkreis 2 zusätzlich der Kondensator 22 vorgesehen ist.

Der zweite Ladestromkreis 3 entspricht im wesentlichen dem zur Ladung des piezoelektrischen Elements 201 vorgesehenen Teil der Schaltung gemäß Fig. 6, wobei der Halbleiterschalter 32 des zweiten Ladestromkreises 3 dem Ladeschalter 202 und der Diode 203 entspricht, und wobei im zweiten Ladestromkreis 3 zusätzlich der Kondensator 33 vorgesehen ist.

Der erste Ladestromkreis 2 und der zweite Ladestromkreis 3 sind so ausgebildet, daß über diese unabhängig von deren jeweiligem Zustand kein das piezoelektrische Element entladender Strom fließen kann.

Die in der Fig. 1 gezeigte und soeben beschriebene Schaltung wird nun so betrieben, daß das piezoelektrische Element schrittweise in mehreren Stufen geladen wird.

Im betrachteten Beispiel erfolgt die Ladung des piezoelektrischen Elements 1 in zwei Stufen, wobei die erste Stufe der Ladung über den ersten Ladestromkreis 2 und die zweite Stufe der Ladung über den zweiten Ladestromkreis 3 erfolgt.

Das Laden des piezoelektrischen Elements 1 über den ersten Ladestromkreis 2 wird durch die Strombegrenzungseinheit 21 gesteuert. Öffnet die Strombegrenzungseinheit und gestattet damit einen (Lade-)Stromfluß im ersten Ladestromkreis 2, so fließen über diese von der Spannungsquelle 4, 5 zugeführte oder im Kondensator 22 gespeicherte Ladungen zum piezoelektrischen Element 1. Die Menge der pro Zeiteinheit fließenden Ladungen wird durch die Strombegrenzungseinheit 21 bestimmt, da diese nicht nur wie ein Schalter wirkt, sondern, wie die Bezeichnung schon andeutet, zusätzlich den fließenden Strom auf einen frei einstellbaren Wert begrenzt.

Durch den Transport von Ladungen zum piezoelektrischen Element 1 wird dieses zunehmend geladen, wobei die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung ansteigt und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements entsprechend zunimmt.

Das Ausmaß und der Verlauf des Spannungsanstiegs bzw. der Ausdehnung des piezoelektrischen Elements sind in dieser Ladestufe durch eine entsprechende Festlegung der Spannung  $U_A$  und ein entsprechendes Betreiben der Strombegrenzungseinheit 21 beliebig festlegbar.

Durch die Strombegrenzungseinheit 21 kann dabei sowohl auf die Geschwindigkeit als auch auf die Linearität des Spannungsanstiegs bzw. der Ausdehnung des piezoelektrischen Elements Einfluß genommen werden. Die Geschwindigkeit hängt von der Größe des (Lade-)Stroms ab, der fließen kann, und die Linearität vom zeitlichen Verlauf der Größe des Ladestroms. Je größer der Ladestrom ist, desto steiler steigen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die dazu im wesentlichen proportionale Ausdehnung des piezoelektrischen Elements an, wobei ein zeitlich konstant gehaltener Ladestrom einen linearen Anstieg zur Folge hat.

Das Laden des piezoelektrischen Elements 1 durch den ersten Ladestromkreis dauert an, bis der Ladestromfluß durch die elektrische Strombegrenzungseinheit 21 unterbunden wird; solange ein Ladestrom fließt, nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements zu.

Wird das Fließen des Ladestroms durch die Strombegrenzungseinheit 21 unterbunden, so wird dadurch auch das Laden des piezoelektrischen Elements 1 unterbunden bzw. unterbrochen. Die im piezoelektrischen Element akkumulierten Ladungen, die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements bleiben dabei jedoch erhalten und können in nachfolgenden Lade- oder Entladestufen erhöht oder verringert werden.

Das Laden des piezoelektrischen Elements durch den ersten Ladestromkreis 2 wird abgebrochen, bevor das piezoelektrische Element vollständig geladen ist. Der Abbruch des Ladens des piezoelektrischen Elements kann nach einer vorbestimmten Zeit oder im Ansprechen auf das Erreichen einer vorbestimmten Spannung am piezoelektrischen Element erfolgen; es erfolgt im vorliegenden Ausführungsbeispiel vorzugsweise dann, wenn das piezoelektrische Element so weit geladen ist, daß es durch die nachfolgend beschriebene zweite Ladestufe automatisch in einen gewünschten (End-)Ladezustand gebracht werden kann.

Das durch die erste Ladestufe begonnene Laden des piezoelektrischen Elements wird in der zweiten Ladestufe fortgesetzt.

Die zweite Stufe des Ladens des piezoelektrischen Elements 1 erfolgt durch den zweiten Ladestromkreis 3; sie wird durch das Schließen des Halbleiterschalters 32 eingeleitet.

Wird der Halbleiterschalter 32 geschlossen, so können durch die Spannungsquelle 4, 5 bereitgestellte oder im Kondensator 33 gespeicherte Ladungen zum piezoelektrischen Element 1 fließen. Die Größe und der zeitliche Verlauf des sich dadurch einstellenden (Lade-)Stroms hängt dabei im wesentlichen von dem durch das piezoelektrische Element 1, die Ladespule 31 und den Kondensator 33 gebildeten LC-Reihenschwingkreis ab. Wie aus der später noch genauer beschriebenen Fig. 4 ersichtlich ist, steigt der Ladestrom mehr oder weniger schnell bis zu einem Maximum an und nimmt dann wieder mehr oder weniger schnell ab; eine richtungsmäßige Umkehr des Stromflusses, durch welche das piezoelektrische Element wieder entladen würde, ist durch den Halbleiterschalter 32, genauer gesagt die darin enthaltene Diode ausgeschlossen.

Wie beim ersten Ladestromkreis 2 hat der Ladestrom auch hier eine Zunahme der im piezoelektrischen Element gespeicherten Ladung und damit auch eine Zunahme der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung und der Ausdehnung des piezoelektrischen Elements zur Folge.

Das Laden des piezoelektrischen Elements über den zweiten Ladestromkreis 3 dauert im betrachteten Ausführungsbeispiel an, bis der Ladestromfluß von sich aus wieder auf Null abgefallen ist; das Laden beginnt und endet also mit der positiven Strom-Halbwelle der ersten Schwingkreis-Schwingung. Erst danach wird der Halbleiterschalter 32 wieder geöffnet.

Solange ein Ladestrom fließt, nehmen die sich am piezoelektrischen Element 1 einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements 1 zu. Die im piezoelektrischen Element 1 akkumulierten Ladungen, die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements bleiben nach dem Abschluß des Ladevorganges im wesentlichen unverändert erhalten.

Wie stark das piezoelektrische Element 1 in der zweiten Ladestufe aufgeladen wird, hängt im vorliegenden Ausführungsbeispiel im wesentlichen ausschließlich von den technischen Daten des piezoelektrischen Elements 1, der Ladespule 31 und des Kondensators 33 ab, denn der Ladeschalter

32 wird ja erst wieder geöffnet, nachdem das Laden infolge des Rückgangs des Ladestroms auf Null bereits beendet ist.

Nichtsdestotrotz kann jedoch nach der zweiten Ladestufe ein wünschgemäßer Ladungszustand des piezoelektrischen Elements erreicht werden, denn dieses kann ja in der ersten Ladestufe im wesentlichen beliebig stark vorgeladen werden.

Obgleich dies vorliegend nicht näher beschrieben ist, kann das Laden des piezoelektrischen Elements durch den zweiten Ladestromkreis 3 auch unter getakteter Ansteuerung, d. h. durch ein mehr oder weniger kurzzeitig aufeinanderfolgendes wiederholtes Öffnen und Schließen des zweiten Ladestromkreises 3 erfolgen.

Das Laden des piezoelektrischen Elements ist beim betrachteten Beispiel nach der zweiten Ladestufe beendet.

Abweichend vom betrachteten Beispiel kann das Laden des piezoelektrischen Elements in beliebig vielen Stufen erfolgen. Die einzelnen Ladestufen können unmittelbar oder (wie im betrachteten Beispiel) mit zwischenzeitlichen Pausen aufeinanderfolgen; sie können bei Bedarf aber auch mehr oder weniger zeitlich überlappend ausgebildet sein.

Zur Durchführung der stufenweisen Ladung des piezoelektrischen Elements können beliebig viele Ladestromkreise vorgesehen werden, die in beliebiger Reihenfolge und beliebig oft, also bei Bedarf auch mehrfach während eines Ladevorganges aktiviert werden können.

Das Laden des piezoelektrischen Elements teils durch den ersten Ladestromkreis 2, d. h. über ein für den Ladestrom im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element (damit ist die Strombegrenzungseinheit 21 gemeint) und teils durch den zweiten Ladestromkreis, d. h. über ein für den Ladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element (damit ist die Ladespule 31 gemeint) erweist sich als besonders vorteilhaft, denn dadurch kann dann, wenn es darauf ankommt, ein ganz bestimmter zeitlicher Verlauf des Ladens des piezoelektrischen Elements eingehalten (Laden durch den ersten Ladestromkreis), und zu allen anderen Zeiten ein hinsichtlich der Verlustleistung (Wärmeerzeugung) optimiertes Laden (Laden durch den zweiten Ladestromkreis) durchgeführt werden.

Die Beschränkung des Betriebs des ersten Ladestromkreises auf diejenigen Abschnitte des Ladevorgangs, zu denen dies unbedingt notwendig ist, ermöglicht es, die durch den Betrieb des ersten Ladestromkreises erzeugte Verlustleistung (Wärmeenergie) möglichst gering zu halten. Das Vorsehen von Maßnahmen zur Kühlung von sich durch das Laden erhitzenden Elementen erfordert deshalb einen nur sehr geringen Aufwand oder kann gänzlich entfallen.

Das nur teilweise Laden des piezoelektrischen Elements durch den zweiten Ladestromkreis, ermöglicht es, diesen kleiner zu dimensionieren als wenn das piezoelektrische Element komplett durch diesen zu laden wäre. Dies wirkt sich vor allem auf die Größe des Kerns der Ladespule 31 vorteilhaft aus, denn dieser muß nur so groß sein, daß er beim auftretenden Ladestrom nicht in die Sättigung gerät. Abgesehen davon kann die Ladespule 31 eine gleichbleibende oder sich zeitlich verändernde Abweichung von ihrer Soll-Induktivität aufweisen, denn die sich hieraus ergebenden Schwankungen in der Ladung des piezoelektrischen Elements durch den zweiten Ladestromkreis sind durch das Laden des piezoelektrischen Elements über den ersten Ladestromkreis kompensierbar.

Das beschriebene mehrstufige Laden des piezoelektrischen Elements erweist sich damit in mehrfacher Hinsicht als vorteilhaft.

Es wird nun unter Bezugnahme auf Fig. 2 das Entladen eines zuvor (auf beliebige Art und Weise) geladenen piezoelektrischen Elements beschrieben.

Das piezoelektrische Element, das es im betrachteten Beispiel zu entladen gilt, ist in der Fig. 2 wiederum mit dem Bezugszeichen 1 bezeichnet.

Das piezoelektrische Element 1 ist Bestandteil zweier unabhängig voneinander arbeitender Entladestromkreise, nämlich eines ersten Entladestromkreises 6 und eines zweiten Entladestromkreises 7.

Der erste Entladestromkreis 6 enthält neben dem piezoelektrischen Element 1 eine Strombegrenzungseinheit 61, wobei diese Elemente wie in der Fig. 2 gezeigt verschaltet sind.

Der zweite Entladestromkreis 7 enthält neben dem piezoelektrischen Element 1 eine Entladespule 71, einen Halbleiterschalter 72 und einen Kondensator 73, wobei diese Elemente wie in der Fig. 2 verschaltet sind.

Der erste Entladestromkreis 6 entspricht im wesentlichen dem zur Entladung des piezoelektrischen Elements 101 vorgesehenen Teil der Schaltung gemäß Fig. 5, wobei die Strombegrenzungseinheit 61 des ersten Entladestromkreises 6 dem Entladetransistor 103 und dem diesen ansteuernde Ladeverstärker 105 entspricht.

Der zweite Entladestromkreis 7 entspricht im wesentlichen dem zur Entladung des piezoelektrischen Elements 201 vorgesehenen Teil der Schaltung gemäß Fig. 6, wobei der Halbleiterschalter 72 des zweiten Entladestromkreises 7 dem Entladeschalter 206 und der Diode 207 entspricht, und wobei beim zweiten Entladestromkreis 7 zusätzlich der Kondensator 73 vorgesehen ist, in welchen, wie später noch genauer beschrieben werden wird, ein Teil der im zu entladenden piezoelektrischen Element gespeicherten Ladungen umgeladen wird.

Die in der Fig. 2 gezeigte und soeben beschriebene Schaltung wird nun so betrieben, daß das piezoelektrische Element 1 schrittweise in mehreren Stufen entladen wird.

Im betrachteten Beispiel erfolgt die Entladung des piezoelektrischen Elements 1 in zwei Stufen, wobei die erste Stufe der Entladung über den zweiten Ladestromkreis 7 und die zweite Stufe der Entladung über den ersten Ladestromkreis 6 erfolgt.

Die erste Stufe des Entladens des piezoelektrischen Elements (durch den zweiten Ladestromkreis 7) wird durch das Schließen des Halbleiterschalters 72 eingeleitet.

Wird der Halbleiterschalter 72 geschlossen, so können im piezoelektrischen Element 1 gespeicherte Ladungen über die Entladespule 71 zum Kondensator 73 fließen. Die Größe und der zeitliche Verlauf des sich dadurch einstellenden (Entlade-) Stroms hängt dabei im wesentlichen von dem durch das piezoelektrische Element 1, die Entladespule 71 und den Kondensator 73 gebildeten LC-Reihenschwingkreis ab. Wie aus der später noch genauer beschriebenen Fig. 4 ersichtlich ist, steigt der Entladestrom mehr oder weniger schnell bis zu einem Maximum an und nimmt dann wieder mehr oder weniger schnell ab; eine richtungsmäßige Umkehr des Stromflusses, durch welche das piezoelektrische Element wieder geladen würde, ist durch den Halbleiterschalter 72, genauer gesagt die darin enthaltene Diode ausgeschlossen.

Der Entladestrom hat ein Umladen der im piezoelektrischen Element 1 gespeicherten Ladung in den Kondensator 73 und damit eine Abnahme der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung und der Ausdehnung des piezoelektrischen Elements zur Folge.

Das Entladen des piezoelektrischen Elements über den zweiten Entladestromkreis 7 dauert im betrachteten Ausführungsbeispiel an, bis der Entladestromfluß von sich aus wieder auf Null abgefallen ist; das Entladen beginnt und endet also mit der positiven Strom-Halbwellen der ersten Schwingkreis-Schwingung. Erst danach wird der Halbleiterschalter

72 wieder geöffnet.

Wie stark das piezoelektrische Element 1 in der ersten Entladestufe entladen wird, hängt im vorliegenden Ausführungsbeispiel im wesentlichen ausschließlich von den technischen Daten des piezoelektrischen Elements 1, der Entladespule 71 und des Kondensators 73 ab, denn der Entladeschalter 72 wird ja erst wieder geöffnet, nachdem das Entladen infolge des Rückgangs des Entladestroms auf Null bereits beendet ist.

Obgleich dies vorliegend nicht näher beschrieben ist, kann das Entladen des piezoelektrischen Elements durch den zweiten Ladestromkreis 7 auch unter getakteter Ansteuerung, d. h. durch ein mehr oder weniger kurzzeitig aufeinanderfolgendes wiederholtes Öffnen und Schließen des zweiten Entladestromkreises 7 erfolgen.

Das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 durch den zweiten Entladestromkreis 7 ist bzw. wird beendet, bevor das piezoelektrische Element vollständig entladen ist.

Die nach der ersten Stufe der Entladung des piezoelektrischen Elements dort verbleibenden Ladungen, die sich dadurch am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements bleiben erhalten und können in nachfolgenden Lade- oder Entladestufen erhöht oder verringert werden.

Die Ladungen, die während der ersten Stufe der Entladung vom piezoelektrischen Element 1 entfernt wurden, sind im wesentlichen vollständig im Kondensator 73 gespeichert und können von dort als elektrische Energie entnommen werden.

Das in der ersten Entladestufe (durch den zweiten Entladestromkreis 7) begonnene Entladen des piezoelektrischen Elements 1 wird in der zweiten Entladestufe (durch den ersten Entladestromkreis 6) fortgesetzt.

Das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 über den ersten Ladestromkreis 6 wird durch die Strombegrenzungseinheit 61 gesteuert. Öffnet die Strombegrenzungseinheit und gestattet damit einen Stromfluß im ersten Entladestromkreis 6, so fließen im piezoelektrischen Element 1 gespeicherte Ladungen gegen Masse ab. Die Menge der pro Zeiteinheit fließenden Ladungen wird durch die Strombegrenzungseinheit 61 bestimmt, da diese wie die Strombegrenzungseinheit 21 des ersten Ladestromkreises 2 nicht nur wie ein Schalter wirkt, sondern zusätzlich in der Lage ist, den fließenden Strom auf einen frei einstellbaren Wert zu begrenzen.

Durch den Abtransport von Ladungen vom piezoelektrischen Element 1 wird dieses zunehmend entladen, wobei die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung sinkt und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements entsprechend abnimmt.

Das Ausmaß und der Verlauf des Spannungsabfalls bzw. des Zusammenziehens des piezoelektrischen Elements sind in dieser zweiten Entladestufe durch ein entsprechendes Betreiben der Strombegrenzungseinheit 61 beliebig festlegbar.

Durch die Strombegrenzungseinheit 61 kann dabei sowohl auf die Geschwindigkeit als auch auf die Linearität der Spannungsabnahme bzw. des Zusammenziehens des piezoelektrischen Elements 1 Einfluß genommen werden. Die Geschwindigkeit hängt von der Größe des Entladestroms ab, der fließen kann, und die Linearität hängt vom zeitlichen Verlauf der Größe des fließenden Stroms ab. Je größer der fließende Strom ist, desto steiler nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die dazu im wesentlichen proportionale Ausdehnung des piezoelektrischen Elements ab, wobei ein zeitlich konstant gehaltenen Strom eine lineare Abnahme zur Folge hat.

Die zweite Stufe der Entladung des piezoelektrischen Elements wird schließlich durch die Strombegrenzungsein-

heit 61 (Sperrern des Entladestromflusses) beendet. Die gezielte Beeinflussbarkeit des Entladevorgangs durch die Strombegrenzungseinheit 61 ermöglicht es auch hierbei, einen wunschgemäßen Verlauf einzuhalten. Insbesondere können Schwingungen und ein Laden des piezoelektrischen Elements mit umgekehrter Polarität (wie es bei einer vollständigen Entladung durch den zweiten Entladestromkreis der Fall sein kann), zuverlässig vermieden werden. Bei Bedarf ist es auch ohne nennenswerte Schwierigkeiten möglich, das piezoelektrische Element nicht vollständig zu entladen, sondern den Entladevorgang im Ansprechen auf das Erreichen einer vorbestimmten Spannung am piezoelektrischen Element zu beenden; auch dies würde bei einer Entladung des piezoelektrischen Elements allein durch den zweiten Entladestromkreis auf nicht unerhebliche Schwierigkeiten stoßen.

Mit der Beendigung der zweiten Stufe des Entladens des piezoelektrischen Elements ist der gesamte Entladevorgang beendet.

Abweichend vom betrachteten Beispiel kann das Entladen des piezoelektrischen Elements in beliebig vielen Stufen erfolgen. Die einzelnen Entladestufen können unmittelbar oder (wie im betrachteten Beispiel) mit zwischenzeitlichen Pausen aufeinanderfolgen; sie können bei Bedarf aber auch mehr oder weniger stark zeitlich überlappend ausgeführt werden.

Zur Durchführung der stufenweisen Entladung des piezoelektrischen Elements können beliebig viele Entladestromkreise vorgesehen werden, die in beliebiger Reihenfolge und beliebig oft, also bei Bedarf auch mehrfach während eines Entladevorganges aktiviert werden können.

Das Entladen des piezoelektrischen Elements teils durch den ersten Entladestromkreis 6, d. h. über ein für den Entladestrom im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element (damit ist die Strombegrenzungseinheit 61 gemeint) und teils durch den zweiten Entladestromkreis, d. h. über ein für den Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element (damit ist die Entladespule 71 gemeint) erweist sich als besonders vorteilhaft, denn dadurch kann dann, wenn es darauf ankommt, ein ganz bestimmter zeitlicher Verlauf des Entladens des piezoelektrischen Elements eingehalten (Entladen durch den ersten Entladestromkreis 6), und zu allen anderen Zeiten ein hinsichtlich der Verlustleistung (Wärmeerzeugung) optimiertes Entladen (Entladen durch den zweiten Entladestromkreis 7) durchgeführt werden.

Die Beschränkung des Betriebs des ersten Entladestromkreises auf diejenigen Abschnitte des Entladevorgangs, zu denen dies unbedingt notwendig ist, ermöglicht es, die durch den ersten Entladestromkreis erzeugte Verlustleistung (Wärmeenergie) möglichst gering zu halten. Das Vorsehen von Maßnahmen zur Kühlung von sich durch das Entladen erhaltenden Elementen erfordert deshalb einen nur sehr geringen Aufwand oder kann gänzlich entfallen.

Das nur teilweise Entladen des piezoelektrischen Elements durch den zweiten Entladestromkreis, ermöglicht es, diesen kleiner zu dimensionieren als wenn das piezoelektrische Element komplett durch diesen zu entladen wäre. Dies wirkt sich vor allem auf die Größe des Kerns der Entladespule 71 vorteilhaft aus, denn dieser muß nur jeweils so groß sein, daß er bei dem auftretenden Entladestrom nicht in die Sättigung gerät. Abgesehen davon kann die Entladespule 71 eine gleichbleibende oder sich zeitlich verändernde Abweichung von ihrer Soll-Induktivität aufweisen, denn die sich hieraus ergebenden Schwankungen in der Entladung des piezoelektrischen Elements durch den zweiten Entladestromkreis sind durch das Entladen des piezoelektrischen Elements über den ersten Entladestromkreis kompensierbar.

Das beschriebene mehrstufige Entladen des piezoelektrischen Elements erweist sich damit in mehrfacher Hinsicht als vorteilhaft.

In der Fig. 3 ist eine Schaltung dargestellt, durch welche sowohl das Laden als auch das Entladen des piezoelektrischen Elements wie vorstehend beschrieben mehrstufig durchführbar sind.

Die Schaltung gemäß Fig. 3 entspricht weitgehend einer Verkettung der Schaltungen gemäß den Fig. 1 und 2; einander entsprechende Elemente sind mit identischen Bezugszeichen bezeichnet.

Bemerkenswert an der Schaltung gemäß Fig. 3 und abweichend von einer reinen Aneinanderreihung der Schaltungen gemäß den Fig. 1 und 2 sind die Funktion und Wirkungsweise einer Spule 8 und eines Kondensators 9. Die Spule 8 wirkt nämlich zugleich als Ladespule und als Entladespule, ersetzt also die Ladespule 31 des zweiten Lade-stromkreises 3 gemäß Fig. 1 und die Entladespule 71 des zweiten Entladestromkreises 7 gemäß Fig. 2. Der Kondensator 9 dient zugleich als Kondensator 33 des zweiten Lade-stromkreises 3 gemäß Fig. 1 und als Kondensator 73 des zweiten Entladestromkreises 7 gemäß Fig. 2.

Durch die Doppelfunktion der Spule 8 und des Kondensators 9 läßt sich die Anzahl der Bauelemente, die für eine Schaltung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens vorzusehen sind, auf ein Minimum reduzieren. Die Doppelfunktion des Kondensators 9 ermöglicht es ferner, daß die Ladungen, die beim Entladen des piezoelektrischen Elements durch den zweiten Entladestromkreis 7 gewonnen werden, dem zweiten Lade-stromkreis 3 zur sofortigen Weiterverwendung zugeführt werden, wodurch auf denkbar einfache Weise eine effektive Energierückführung realisiert ist.

Die Schaltung gemäß Fig. 3 wird wie die Schaltungen gemäß den Fig. 1 und 2 betrieben. Die bei der Beschreibung der Fig. 1 und 2 gemachten Ausführungen gelten daher in entsprechender Weise auch für die Fig. 3.

Betrieibt man die in der Fig. 3 gezeigte Schaltung wie die Schaltungen gemäß den Fig. 1 und 2, so stellen sich die in der Fig. 4 gezeigten Strom- und Spannungsverläufe ein. Die gezeigten Strom- und Spannungsverläufe sind das Ergebnis einer Simulation, in welcher das piezoelektrische Element als reine Kapazität modelliert wurde.

Die in der Fig. 4 dargestellten Kurven sind mit deren Meßgrößen repräsentierenden Symbolen versehen. Von den verwendeten Symbolen repräsentieren

- die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung  $U_p$
- ▽ die sich am Kondensator 22 einstellende Spannung  $U_A$ ,
- ◇ die sich am Kondensator 9 einstellende Spannung  $U_B$ ,
- + den im ersten Lade-stromkreis fließenden Lade-strom  $I_{DMR}$ ,
- den im zweiten Lade-stromkreis fließenden Lade-strom  $I_{DI}$ ,
- △ den im zweiten Entladestromkreis fließenden Entlade-strom  $I_{D2}$ , und
- x den im ersten Entladestromkreis fließenden Entlade-strom  $I_{DMF}$

Die in der Fig. 4 gezeigten Strom- und Spannungsverläufe sind das Ergebnis der erfindungsgemäßen Ansteuerung der Schaltung gemäß Fig. 3; sie sind bei der vorstehend vermittelten Kenntnis des Aufbaus, der Funktion und der Wirkungsweise der Schaltungen gemäß den Fig. 1 bis 3 ohne weiteres verständlich und bedürfen keiner näheren Erläuterung.

Bemerkenswert an Fig. 4 ist der glatte und weitestgehend lineare Verlauf Spannung  $U_p$  die sich beim Laden und beim Entladen am piezoelektrischen Element einstellt. Hieraus ist



ersichtlich, daß das erfindungsgemäße Verfahren zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen den bisher bekannten Verfahren deutlich überlegen ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen in vielfacher Hinsicht vorteilhaft sind.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Laden oder Entladen eines piezoelektrischen Elements (1), wobei das Laden oder Entladen schrittweise in mehreren Stufen erfolgt, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Laden oder Entladen teils über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element (21; 61) und teils über ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element (8; 31; 71) erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Element, das für den Lade- oder Entladestrom als eine Resistanz (21; 61) wirkt, ein Element verwendet wird, dessen Resistanz vor oder während des Lade- oder Entladevorganges veränderbar ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Element, das für den Lade- oder Entladestrom als eine Resistanz (21; 61) wirkt, eine Strombegrenzungseinheit oder ein Teil derselben verwendet wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Element, das für den Lade- oder Entladestrom als eine Resistanz (21; 61) wirkt, ein Transistor verwendet wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Element, das für den Lade- oder Entladestrom als eine Induktanz (8; 31; 71) wirkt, eine Spule verwendet wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Laden in einer ersten Ladestufe über ein für den Ladestrom ( $I_{LVR}$ ) im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element (21) erfolgt.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Laden in einer in sich an die erste Ladestufe anschließenden zweiten Ladestufe über ein für den Ladestrom ( $I_{D1}$ ) im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element (8; 31) erfolgt.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Entladen in einer ersten Entladestufe über ein für den Entladestrom ( $I_{D2}$ ) im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element (8; 71) erfolgt.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Entladen in einer in sich an die erste Entladestufe anschließenden zweiten Entladestufe über ein für den Entladestrom ( $I_{DMF}$ ) im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element (61) erfolgt.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß beim Entladen des piezoelektrischen Elements (1) über ein für den Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element (8; 71) die vom piezoelektrischen Element abgezogenen Ladungen in einen Kondensator (9; 73) umgespeichert werden.
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß als Kondensator (9; 33), in welchen die

Ladungen des piezoelektrischen Elements beim Entladen desselben umgeladen werden, ein einer Spannungsquelle nachgeschalteter Pufferkondensator (9) in einem Ladestromkreis verwendet wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Element, das für den Ladestrom als Induktanz wirkt und als Element, das für den Entladestrom als Induktanz wirkt, ein- und dasselbe Element (8) verwendet wird.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Laden oder Entladen über ein für den Lade- oder Entladestrom als Resistanz wirkendes Element (21; 61) im Ansprechen auf das Erreichen einer vorbestimmten Spannung am piezoelektrischen Element (1) beendet wird.

14. Vorrichtung zum Laden oder Entladen eines piezoelektrischen Elements (1), wobei das Laden oder Entladen schrittweise in mehreren Stufen erfolgt, dadurch gekennzeichnet, daß sowohl ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Resistanz wirkendes Element (21; 61) als auch ein für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element (8; 31; 71) vorgesehen sind, und daß diese Elemente derart angeordnet sind, daß das Laden oder Entladen teils über das für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als Resistanz wirkende Element und teils über das für den Lade- oder Entladestrom im wesentlichen als Induktanz wirkende Element erfolgen kann.

---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---



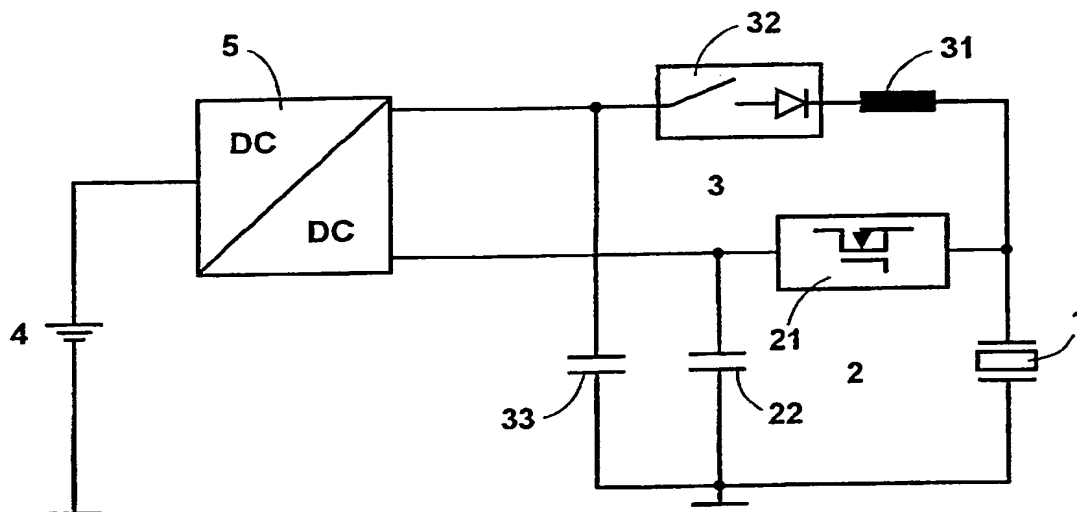


FIG. 1

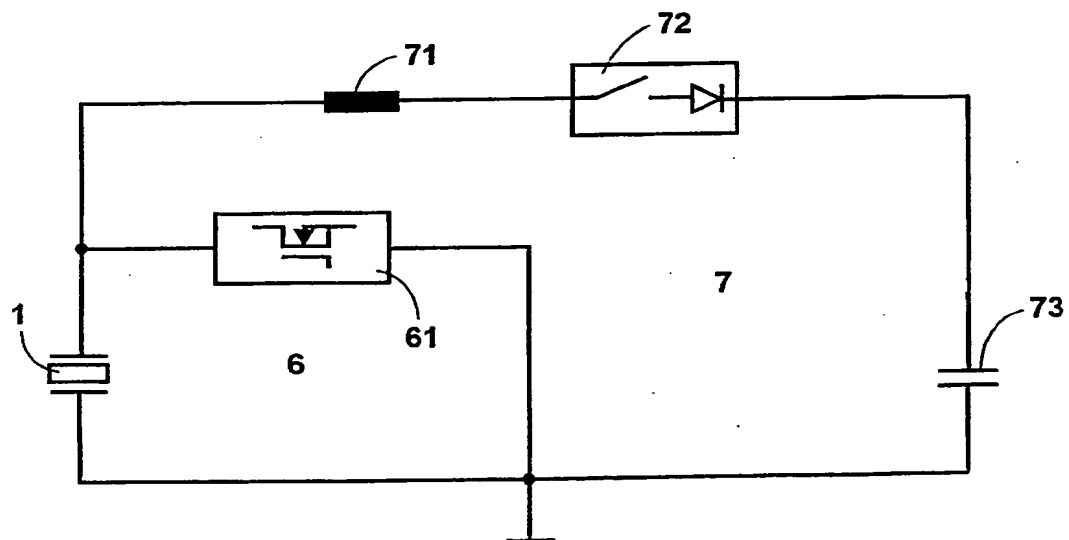


FIG. 2

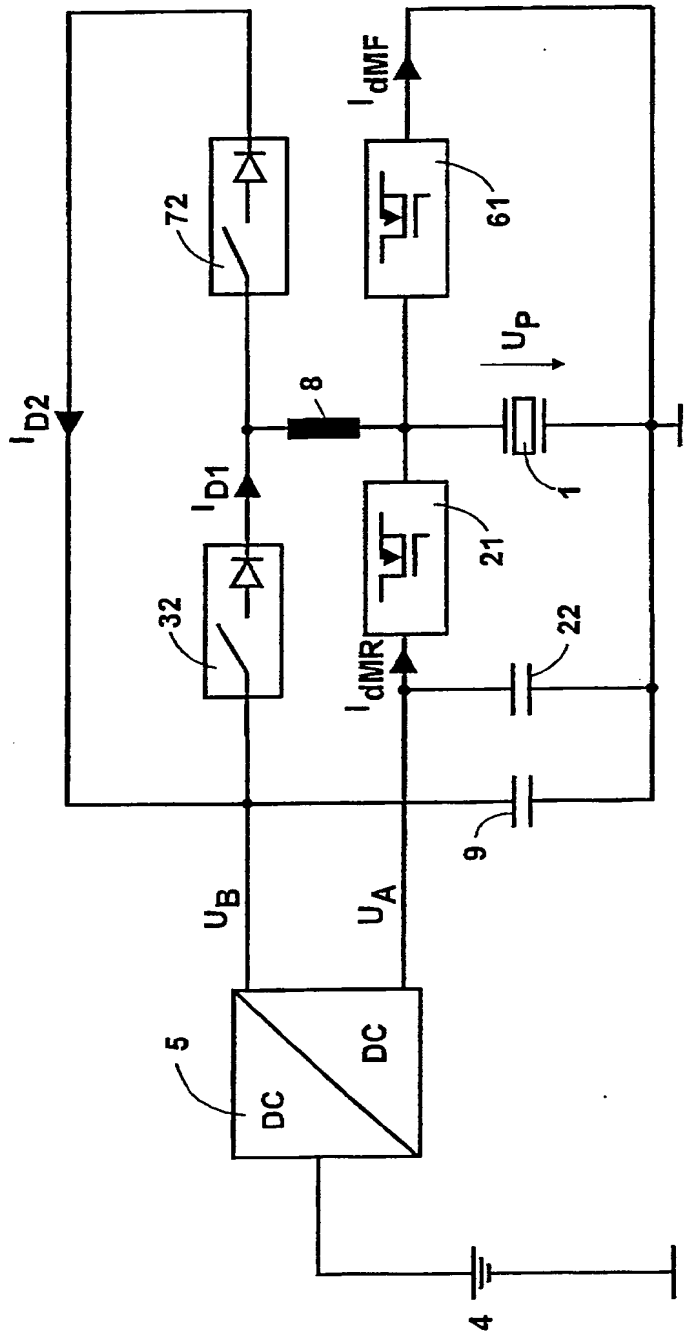
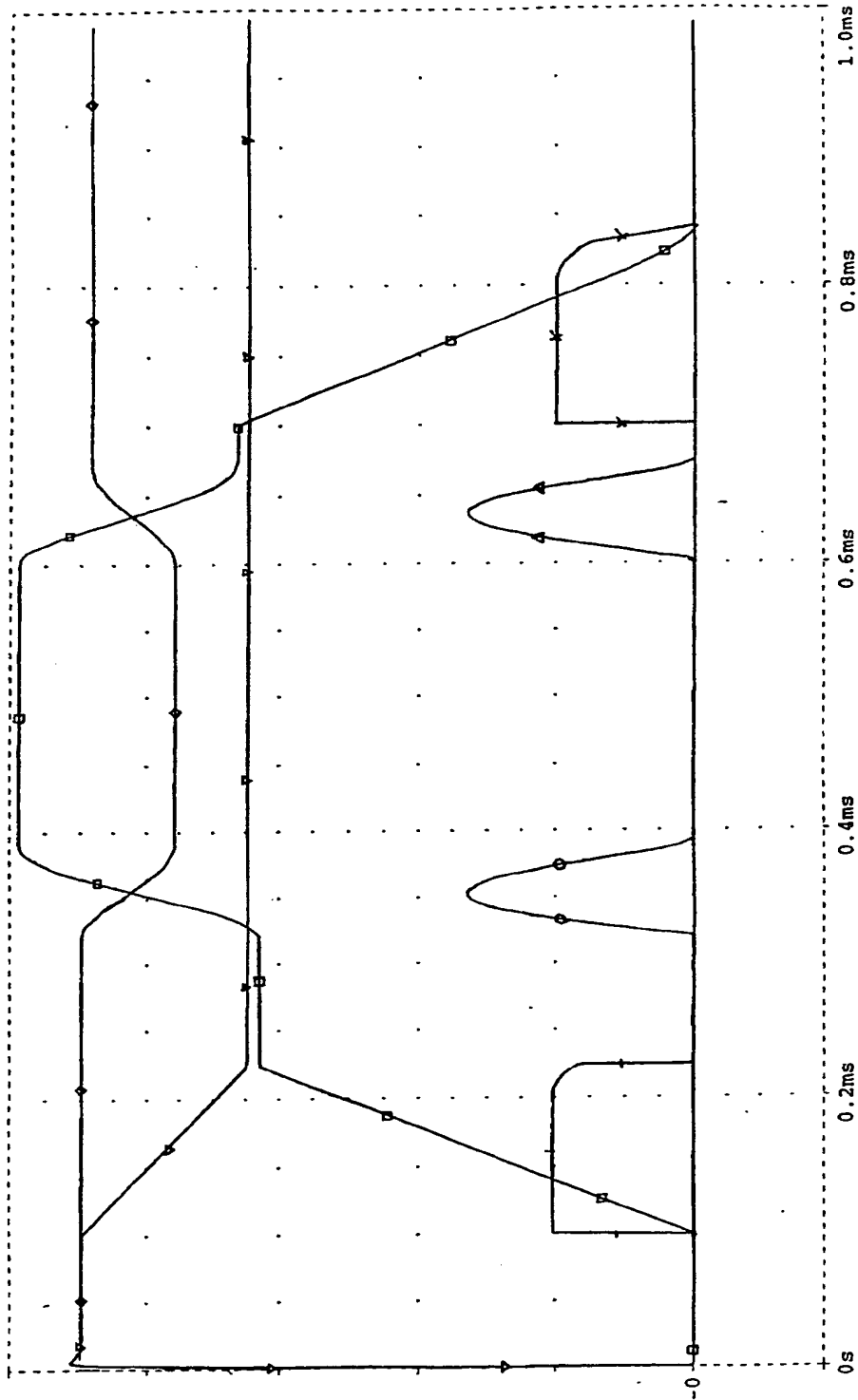
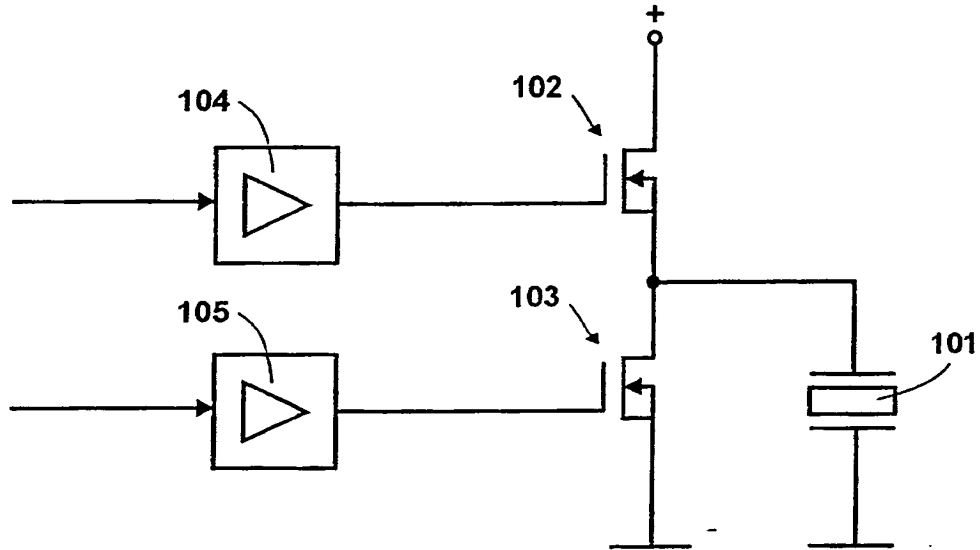


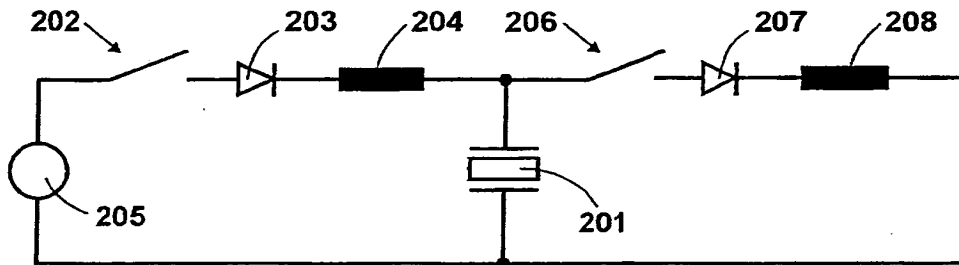
FIG. 3



**FIG. 4**



**FIG. 5**



**FIG. 6**

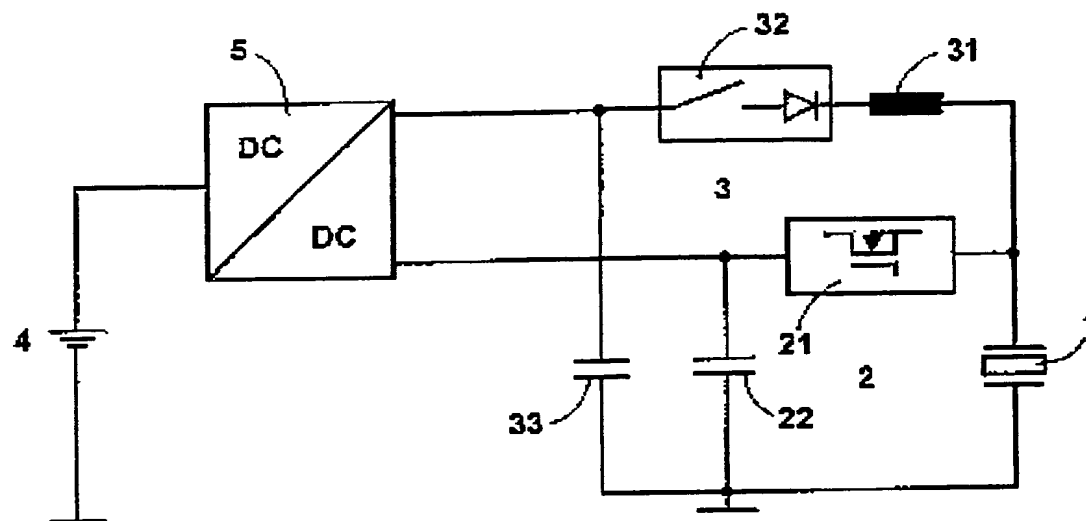


FIG. 1

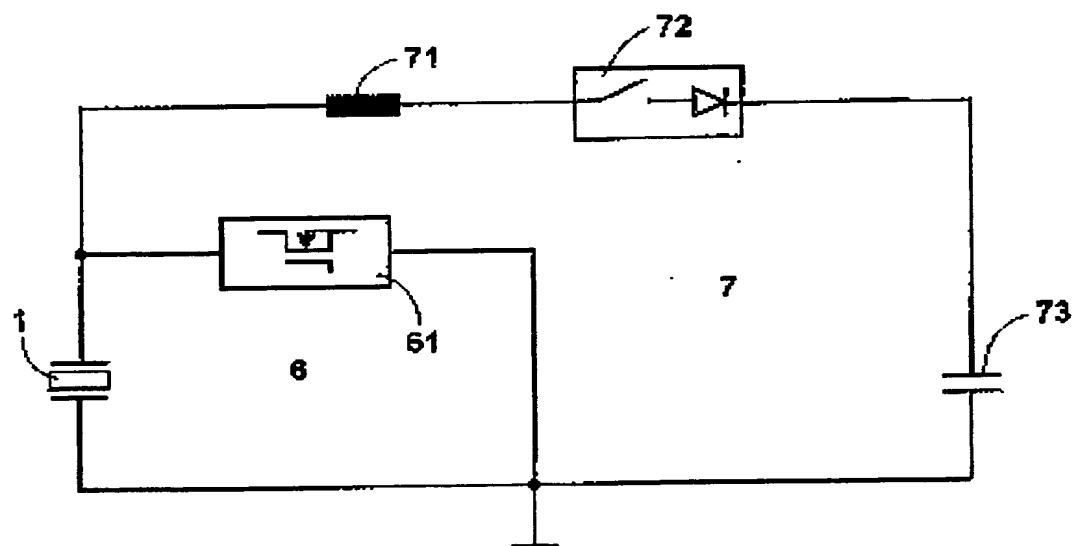
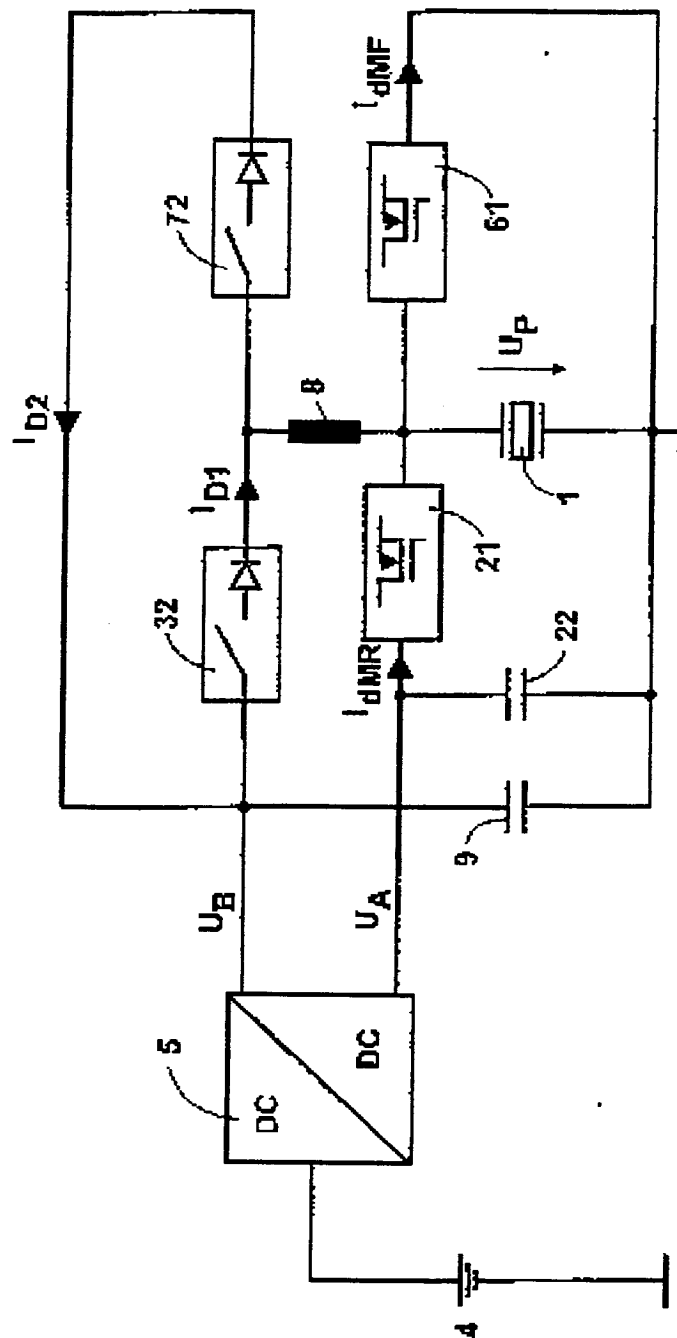


FIG. 2



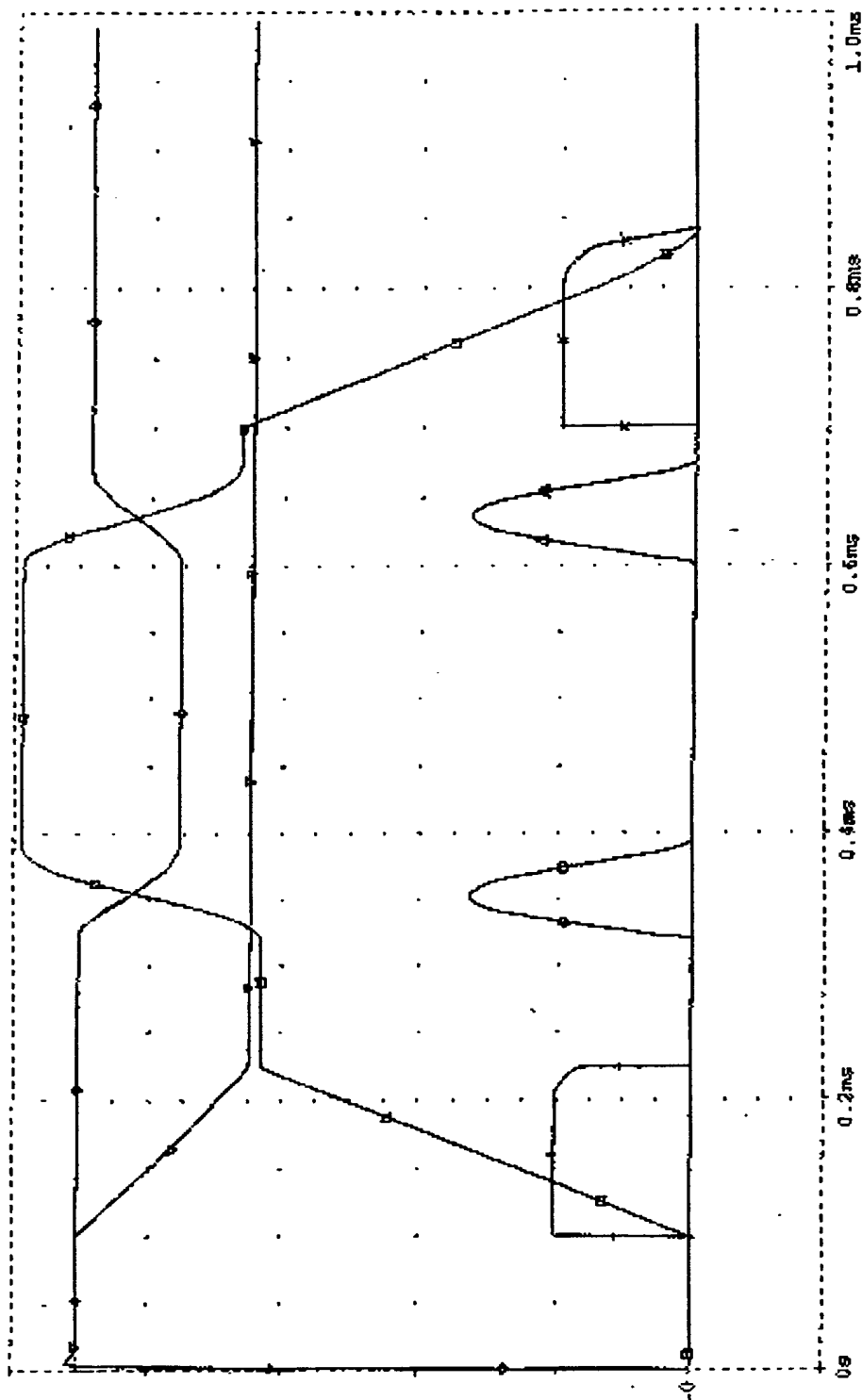


FIG. 4



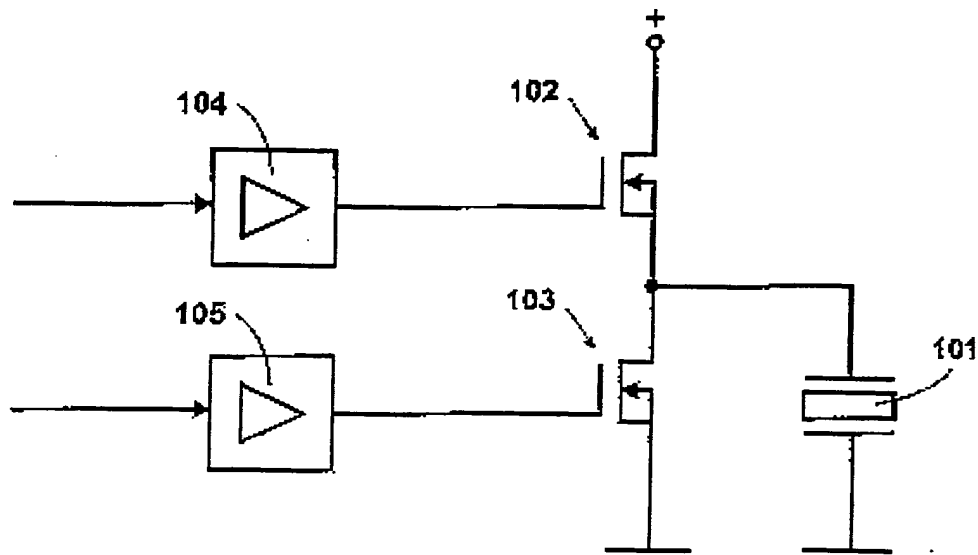


FIG. 5

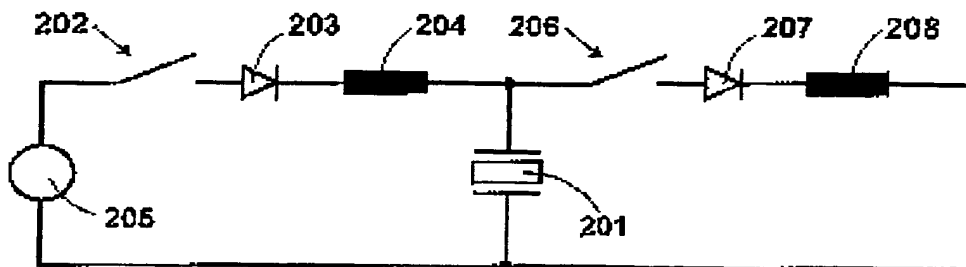


FIG. 6